

Pemodelan pada Pengeringan Pneumatik Mekanis Tepung Kasava: Hubungan Koefisien Pindah Panas dengan Variabel Pengeringan

Modelling on Mechanical Cassava Flour Pneumatic Drying:
Correlation of Heat Transfer Coefficient and Drying Variables

Yus Witdarko¹, Nursigit Bintoro², Bandul Suratmo², Budi Rahardjo²

¹Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Musamus,
Jl. Kamizaun, Mopah Lama, Merauke 99611, Indonesia

²Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Jl. Flora No. 1,
Bulaksumur, Yogyakarta 55281, Indonesia
Email: buluhbulan@gmail.com

Submisi: 12 Februari 2015; Penerimaan: 14 September 2015

ABSTRAK

Pada proses pengeringan tepung kasava secara pneumatik, perpindahan panas terjadi terutama secara konveksi. Salah satu parameter yang digunakan untuk mengevaluasi efektivitas kinerja proses pengeringan tersebut adalah koefisien perpindahan panas (h) yang terjadi selama pengeringan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghubungkan secara matematis antara nilai h dengan beberapa variabel proses pengeringan pneumatik tepung kasava dengan menggunakan metode analisis dimensi. Pada penelitian ini telah dikonstruksi suatu mesin pengering pneumatik yang dirancang untuk dapat dilakukan pengaturan-pengaturan sesuai dengan kebutuhan data penelitian yang akan dikumpulkan. Beberapa parameter yang terkait dengan sifat fisik dan sifat termis bahan serta operasional mesin pengering diukur dan digunakan sebagai variabel-variabel analisis yang diselesaikan dengan metode analisis dimensi. Berdasarkan hasil analisis data diperoleh hubungan antara nilai h dengan variabel-variabel proses pengeringan sebagai berikut

$$\left(\frac{h}{\rho_{pr} V_u^2 C_{ppr}}\right) = 1,7442 \times 10^{-3} \cdot \left(\frac{T_u}{T_{bo}}\right)^{0,7312} \cdot \left(\frac{Q_t^2}{\rho_{pr}^2 \cdot D_{pr}^4 \cdot T_{bo} \cdot C_{ppr}}\right)^{-0,4729} \cdot \left(\frac{V_u^2}{T_{bo} C_{ppr}}\right)^{-1,5002}$$

Persamaan tersebut mempunyai nilai koefisien determinasi yang cukup besar, sehingga dapat digunakan untuk memprediksi koefisien perpindahan panas pada pengeringan *pneumatic*. Hasil uji sensitivitas menunjukkan bahwa *dimensionless product* yang paling berpengaruh terhadap nilai h adalah $\frac{V_u^2}{T_{bo} C_{ppr}}$.

Kata kunci: Tepung kasava; analisis dimensi; koefisien perpindahan panas; *pneumatic drying*

ABSTRACT

In the cassava flour pneumatic drying process, mostly heat transfer occurred in convective mode. One of variables which could be used to evaluate the effectiveness of drying process performance is heat transfer coefficient (h) during drying. The objectives of the research was to formulate a mathematical relationship between h and various pneumatic drying process variables of cassava flour by applying dimensional analysis. In the following research it had been constructed a pneumatic drying machine which was able to be according to the needed data that will be collected. Several parameters related to physical and thermal properties as well as operation of the drying machine were measured and used as the analysis variables was solved using dimensional analysis. Based on the result of the data, it was obtained that the relationship between h and the drying process variables could be expressed as follows

$$\left(\frac{h}{\rho_{pr} V_u^2 C_{ppr}}\right) = 1,7442 \times 10^{-3} \cdot \left(\frac{T_u}{T_{bo}}\right)^{0,7312} \cdot \left(\frac{Q_i^2}{\rho_{pr}^2 \cdot D_{pr}^4 \cdot T_{bo} \cdot C_{ppr}}\right)^{-0,4729} \cdot \left(\frac{V_u^2}{T_{bo} C_{ppr}}\right)^{-1,5002}$$

This equation had quite high coefficient of determination, so that it could be used to predict the heat transfer coefficient in pneumatic drying process. Sensitivity analysis indicated that the dimensionless product which had the largest effect on h was $\frac{V_u^2}{T_{bo} C_{ppr}}$.

Keywords: Cassava flour; dimensional analysis; heat transfer coefficient; pneumatic drying

PENDAHULUAN

Pengeringan merupakan salah satu proses yang sangat penting dalam pengolahan pangan, karena proses pengeringan merupakan tahapan yang membutuhkan energi yang sangat besar dan mahal (Desrosier, 2008). Proses utama dalam pengeringan adalah proses perpindahan panas dari medium pengering ke dalam bahan yang dikeringkan. Menurut Pelegrina dan Crapiste (2001), pengeringan *pneumatic* secara luas digunakan dalam industri makanan untuk mendapatkan produk berkualitas tinggi, khususnya biji-bijian, tepung, sayur, dan buah-buahan. Pengeringan *pneumatic* pada industri makanan untuk pengeringan bahan bubuk secara cepat (Baker, 1992). Pada proses semacam ini, kasava dalam bentuk parutan yang telah dikempa untuk mengurangi kadar air awal, diangkut dengan aliran udara panas di dalam pipa-pipa mesin pengering. Untuk dapat mengendalikan proses pengeringan ini dengan baik, perlu diketahui berbagai macam faktor yang mempengaruhi kinerja proses. Salah satu parameter penting yang digunakan untuk mengevaluasi efektivitas kinerja proses tersebut adalah koefisien perpindahan panas yang terjadi selama pengeringan. Pada proses pengeringan tepung kasava secara *pneumatic*, proses perpindahan panas terjadi terutama secara konveksi. Oleh karena itu, penting sekali dapat mengetahui nilai koefisien perpindahan panas konveksi (h) dari proses pengeringan tersebut. Tinggi rendahnya nilai koefisien perpindahan panas konveksi dapat digunakan untuk mengevaluasi, baik efektivitas proses pengeringan itu sendiri maupun kesesuaian desain mesin pengering yang dibuat.

Koefisien perpindahan panas konveksi menunjukkan jumlah panas yang dipindahkan dari medium pemanas ke dalam bahan yang dikeringkan per satuan luas bahan pada setiap perbedaan temperatur antara bahan dengan medium pemanas. Berbagai macam variabel seperti operasional proses pengeringan, desain mesin pengering, maupun sifat-sifat bahan yang dikeringkan sangat menentukan terhadap tinggi rendahnya nilai koefisien perpindahan panas konveksi proses pengeringan. Pada proses pengeringan secara konveksi, maka semakin tinggi nilai koefisien perpindahan panas konveksi akan semakin efektif proses perpindahan panas dari

Tabel 1. Nilai koefisien perpindahan panas pada fluida

Mekanisme (<i>mechanism</i>)	Rentang nilai dari h (Range of value of h ($W/m^2.K$))
Pengembunan uap (<i>condensing steam</i>)	5.700-28.000
Pengembunan bahan-bahan organik (<i>condensing organics</i>)	1.100-2.800
Cairan yang mendidih (<i>boiling liquids</i>)	1.700-28.000
Air mengalir (<i>moving water</i>)	280-17.000
Hidrokarbon mengalir (<i>moving hydrocarbons</i>)	55-1.700
Udara diam (<i>still air</i>)	2,8-23
Udara bergerak (<i>moving air</i>)	11,3-55

medium pemanas ke bahan, sehingga proses penguapan air akan semakin besar, dan akhirnya akan mempercepat waktu pengeringan, yang berarti pula proses semakin ekonomis. Demikian pula semakin tinggi nilai koefisien perpindahan panas konveksi menunjukkan bahwa desain mesin pengering yang dibuat semakin baik, dalam arti semakin mampu mengkonservasi panas udara pengering sehingga tidak banyak yang lepas ke lingkungan luar.

Pada kondisi *unsteady state*, semakin cepat aliran udara dan semakin halus permukaan bahan maka akan semakin tinggi nilai h . Geankoplis (1995), memberikan nilai koefisien perpindahan panas pada fluida bergerak maupun diam seperti Tabel 1 berikut ini.

Dari Tabel 1 tersebut dapat dilihat bahwa semakin tinggi kecepatan udara atau fluida maka akan semakin besar pula nilai koefisien perpindahan panas konveksinya. Sebagai contoh udara yang bergerak mempunyai nilai h 2,3 sampai dengan 4,0 kali dibandingkan dengan udara yang diam.

Mansoori dkk. (2002), pada penelitiannya tentang aliran turbulen partikel padat dengan memvariasi bilangan Re pada diameter partikel pasir tetap 200 μm , memberikan hubungan matematis untuk koefisien pindah panas dalam bentuk hubungan matematis antara bilangan Nusselt (Nu) dengan bilangan Reynolds (Re), dan Prandtl (Pr) sebagai berikut:

$$Nu = \frac{h \cdot d}{k} = 2 + 0,6 Re^{0,5} Pr^{0,3} \quad (1)$$

Dimana h adalah koefisien perpindahan panas, d adalah diameter partikel, dan k adalah konduktivitas panas.

Sedangkan Rajan dkk. (2008), melakukan penelitian tentang pengangkutan partikel gypsumse cara *pneumatic* dengan memvariasi kapasitas input bahan 0,6 g/s sampai dengan 9,9 g/s, kecepatan udara 4,21 m/s sampai dengan 6,47 m/s, dan ukuran partikel 231 μm sampai dengan 722,5 μm pada pipa dengan diameter dalam 54 mm dengan temperatur udara pengering tetap 180 °C, memberikan hubungan matematis yang dapat digunakan untuk menentukan nilai koefisien perpindahan panas dalam bentuk hubungan antara bilangan *Reynolds* (Re), perbandingan aliran massa gas dan zat padat (F_m) dan bilangan *Federov* (Fe) sebagai berikut

Untuk fase encer:

$$Nu = \frac{h \cdot d}{k} = 8,2951 \times 10^{-7} Re^{5,3365} F_m^{-1,3863} Fe^{-5,0530} \quad (2)$$

Untuk fase padat:

$$Nu = \frac{h \cdot d}{k} = 1,3360 \times 10^{-4} Re^{2,7624} F_m^{0,6792} Fe^{-1,834} \quad (3)$$

Bertoli (2000), melakukan studi analitik pengangkutan pneumatik pada partikel *oil shale fines* pada temperatur dinding 300 °C sampai dengan 700 °C, temperatur udara masuk 25 °C sampai dengan 150 °C, temperatur partikel 28 °C sampai dengan 32,7 °C, koefisien pindah panas dinding 18,87 $\text{W/m}^2\text{°C}$ sampai dengan 19,36 $\text{W/m}^2\text{°C}$, dan koefisien pindah panas udara ke partikel 271,6 $\text{W/m}^2\text{°C}$ sampai dengan 387,2 $\text{W/m}^2\text{°C}$, memberikan hubungan matematis antara bilangan *Nusselt* (Nu) dengan bilangan *Reynolds* (Re), dalam bentuk persamaan eksponensial sebagai berikut:

$$Nu = \frac{h \cdot d}{k} = 2,38 \times 10^{-3} (Re)^n \left[\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right]^{0,97} \quad (4)$$

$$\text{Dengan } n = 2,48 \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right)^{-0,28} \text{ dan } \varepsilon \text{ adalah void fraction} \quad (5)$$

Tanaka dkk. (2008), melakukan pengeringan tepung beras dengan variasi temperatur udara pengering 105 °C sampai dengan 145 °C pada diameter partikel 137,15 μm . Hasil penelitian memberikan hubungan matematis antara koefisien perpindahan panas konveksi dengan konduktivitas termal udara pengering (λ_a), bilangan *Prandtl* (Pr), bilangan *Reynold* (Re), dan diameter partikel (d_p), dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$h = \frac{\lambda_a (2 + 0,6 Pr^{1/3} Re^{1/2})}{d_p} \quad (6)$$

Selanjutnya Bunyawanichakul dkk. (2007), melakukan pengeringan pneumatik bijian beras dengan memvariasi

diameter pipa pengering 0,102 m sampai dengan 0,203 m, kapasitas input bijian 0,5 kg/s sampai dengan 1 kg/s, dan kecepatan udara pengering 15 m/s sampai dengan 23 m/s pada temperatur udara pengering tetap 110 °C. Hasil penelitian diberikan hubungan matematis antara bilangan *Nusselt* (Nu) dengan bilangan *Reynolds* (Re), bilangan *Prandtl* (Pr), dan viskositas udara dalam bentuk

$$Nu = \frac{h \cdot d}{k} = 2 + (0,4 Re^{0,5} 0,006 Re^{2/3}) \cdot Pr^{0,4} \cdot (\mu_\infty / \mu_w) \quad (7)$$

Dimana adalah viskositas udara

Singh dan Heldman (1998), menyatakan bahwa bilangan Biot (N_{Bi}) adalah perbandingan resistensi internal terhadap pindah panas dalam padatan dengan resistensi eksternal terhadap perpindahan panas di permukaan padatan. Untuk nilai Biot lebih kecil dari 0,1 maka nilai resistensi internal pada perpindahan panas diabaikan. Jika resistensi internal diabaikan berarti temperatur dianggap seragam pada bagian permukaan dan bagian dalam bahan. Kondisi ini disebut "Lumped" sistem. Bentuk ekspresi persamaan matematis yang menggambarkan perpindahan panas untuk kondisi ini adalah:

$$\rho \cdot C_p \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} = h \cdot A (T_u - T_{bo}) \quad (8)$$

$$-\ln \left(\frac{T_u - T_t}{T_u - T_{bo}} \right) = \frac{h \cdot A \cdot t}{\rho \cdot C_p \cdot V} \quad (9)$$

Secara teoritis persamaan ini dapat juga digunakan untuk mencari nilai koefisien perpindahan panas konveksi bila beberapa variabel-variabel yang dibutuhkan tersebut diketahui. Dari hasil-hasil penelitian dan juga analisis secara teoritis, hingga saat ini belum ada persamaan matematis yang menghubungkan antara koefisien perpindahan panas dengan variabel-variabel proses pengeringan untuk tepung kasava secara pneumatik. Oleh karena itu, perlu dicari hubungan matematis antara koefisien perpindahan panas bahan tepung kasava dengan kondisi proses pengeringannya.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menghubungkan secara matematis koefisien perpindahan panas dengan beberapa variabel proses pengeringan pneumatik dengan menggunakan metode analisis dimensi. Dengan adanya hubungan matematis ini maka akan membantu para praktisi dalam mengkonstruksi mesin pengering *pneumatic* maupun operator mesin pengering untuk meningkatkan operasional proses pengeringan yang lebih efisien.

METODE PENELITIAN

Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mencari hubungan kuantitatif antara sifat-sifat fisik tepung yang dikeringkan, mesin pengering serta proses pengeringannya

Prosedur Penelitian

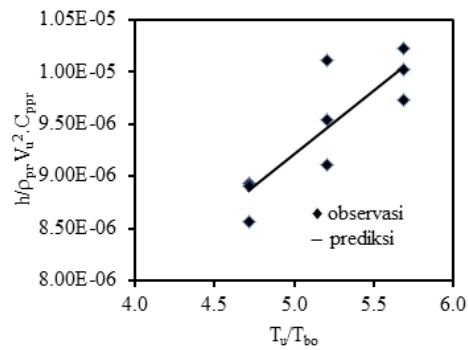
Pelaksanaan penelitian dimulai dengan menghidupkan mesin pengering *flash dryer*, kemudian dilakukan pengaturan-pengaturan sesuai dengan keperluan dalam penelitian. Pada penelitian ini temperatur udara T_u pengering divariasi sebanyak tiga tingkat yaitu 145 °C, 160 °C, dan 175 °C, kapasitas input Q_i divariasi tiga macam 0,0371 kg/s, 0,0509 kg/s, dan 0,0616 kg/s dan densitas partikel tepung ρ_{pr} yang dikeringkan yaitu 1 229 kg/m³, 1 266 kg/m³, dan 1 319 kg/m³. Adapun kecepatan aliran udara pengering divariasi dalam tiga tingkat yaitu 17,12 m/s, 18,10 m/s, dan 19,29 m/s. Panas jenis partikel tepung C_{ppr} adalah tetap 2 176,6 m²/s²°C dihitung secara teoritis. Data-data lain yang dibutuhkan untuk kepentingan analisis dimensi seperti diameter partikel D_{pr} adalah 0,2644 mm, T_{bo} sebesar 30,59 °C, dan lama waktu pengeringan θ diukur secara langsung pada saat proses pengeringan, yaitu saat tepung mulai masuk ke mesin sampai dengan keluar dari *cyclone*. Selanjutnya untuk pengukuran nilai temperatur partikel tepung (T_b), karena pengeringan berlangsung cepat maka T_b yang dipakai adalah temperatur tepung saat keluar dari *cyclone*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan data-data hasil penelitian, maka dapat disusun hubungan matematis untuk memperoleh nilai-nilai konstanta persamaan yang telah diformulasikan dengan analisis regresi berganda dari nilai log persamaan (15). Dari analisis tersebut diperoleh nilai-nilai konstanta C, a, b, dan c yaitu $1,7442 \times 10^{-3}$, 0,7312, -0,4729, dan 1,5002, sehingga hubungan antara h dengan variabel-variabel proses pengeringan dapat ditulis sebagai berikut:

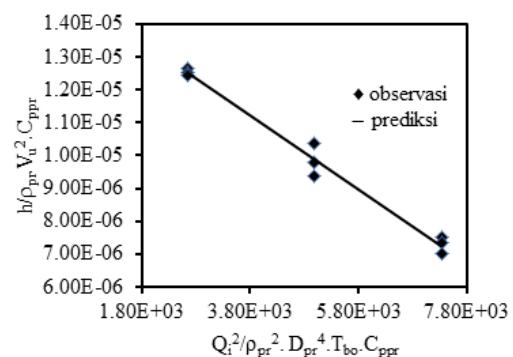
$$\left(\frac{h}{\rho_{pr} V_u^2 C_{ppr}}\right) = 1,7442 \times 10^{-3} \cdot \left(\frac{T_u}{T_{bo}}\right)^{0,7312} \cdot \left(\frac{Q_i^2}{\rho_{pr}^2 \cdot D_{pr}^2 \cdot T_{bo} \cdot C_{ppr}}\right)^{-0,4729} \cdot \left(\frac{V_u^2}{T_{bo} C_{ppr}}\right)^{-1,5002} \quad (16)$$

Pada Gambar 2 dapat dilihat hubungan antara dengan , dengan nilai divariasi dari 4,714 sampai dengan 5,689 dimana semakin besar perbedaan nilai temperatur udara pengering T_u dan temperatur bahan awal T_{bo} , maka nilai h akan semakin membesar. Hal ini karena semakin besar perbedaan kedua temperatur tersebut berarti semakin banyak panas yang dapat diserap bahan atau hanya sedikit *supply* panas pengeringan yang hilang ke lingkungan, sehingga efektifitas proses pengeringan semakin meningkat. Kondisi ini akan terjadi pada semua proses pengeringan tepung secara *pneumatic*. Selama kondisi pengeringan tersebut memenuhi batas keberlakuan persamaan yang dihasilkan pada penelitian ini.

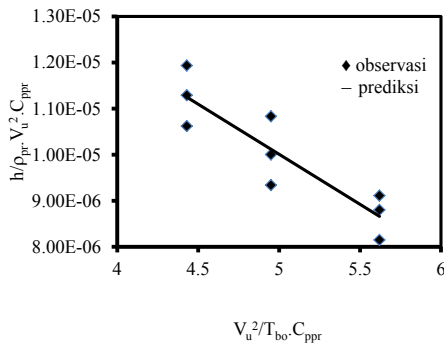


Gambar 2. Grafik hubungan T_u/T_{bo} dengan $\frac{h}{\rho_{pr} V_u^2 C_{ppr}}$

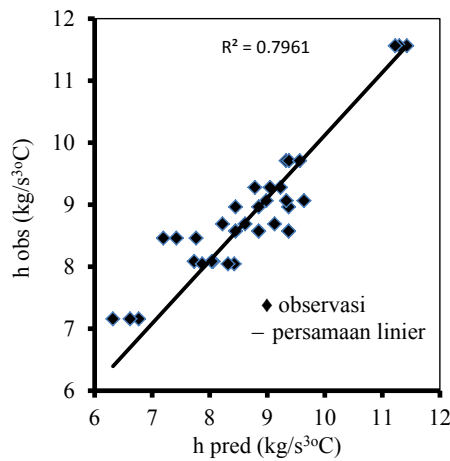
Gambar 3 menunjukkan hubungan antara dengan dengan variasi dari 2.653,1 sampai dengan 7.328,5 dapat diketahui bahwa naiknya nilai rasio dapat disebabkan karena meningkatnya nilai Q_i . Peningkatan nilai Q_i ini berarti semakin banyak bahan yang harus dikeringkan per satuan waktu yang akan mengakibatkan peningkatan temperatur bahan yang hanya kecil dan pada akhirnya akan menurunkan nilai h pada proses pengeringan tersebut. Demikian pula bahwa peningkatan nilai rasio tersebut dapat disebabkan karena penurunan salah satu atau beberapa nilai dari variabel-variabel ρ_{pr} , D_{pr} , T_{bo} , dan C_{ppr} , yang pada dasarnya akan mengakibatkan penurunan panas yang dapat diserap oleh bahan sehingga mengakibatkan menurunnya temperatur bahan dan akhirnya mengakibatkan nilai h menurun. Pada ukuran diameter partikel (D_{pr}) tertentu, maka densitas partikel bahan tersebut akan tetap, maka nilai C_{ppr} dan T_{bo} sangat berperan dalam menentukan tinggi rendahnya nilai h. Dimana semakin kecil nilai C_{ppr} dan T_{bo} dari bahan yang dikeringkan maka akan menghasilkan nilai h yang semakin kecil pula.



Gambar 3. Grafik hubungan $Q_i^2/\rho_{pr}^2 \cdot D_{pr}^2 \cdot T_{bo} \cdot C_{ppr}$ dengan $\frac{h}{\rho_{pr} V_u^2 C_{ppr}}$


 Gambar 4. Grafik hubungan $V_u^2/T_{bo}.C_{ppr}$ dengan $\frac{h}{\rho_{pr}V_u^2.C_{ppr}}$

Gambar 4 menunjukkan hubungan antara $\frac{h}{\rho_{pr}V_u^2.C_{ppr}}$ dengan $\frac{V_u^2}{T_{bo}.C_{ppr}}$ dimana pada penelitian ini $\frac{V_u^2}{T_{bo}.C_{ppr}}$ divariasi dari 4,43 sampai dengan 5,62. Dapat diketahui bahwa semakin besar kecepatan udara pengering dan semakin kecil nilai temperatur bahan awal T_{bo} serta panas jenis tepung C_{ppr} , maka nilai rasio $\frac{V_u^2}{T_{bo}.C_{ppr}}$ semakin besar dan sebaliknya nilai h akan semakin menurun. Meningkatnya kecepatan udara pengering V_u , menunjukkan bahwa lama waktu kontak antara bahan tepung kasava dengan udara pengering yang semakin singkat. Sedangkan mengecilnya C_{ppr} mengindikasikan semakin kecilnya panas yang dapat diserap oleh bahan, demikian juga menurunnya T_{bo} juga semakin memperkecil nilai C_{ppr} yang mengakibatkan menurunnya nilai h . Nilai C_{ppr} tepung kasava yang rendah semakin juga kondisi tepung kasava yang basah (kadar air ± 40 %wb) atau dengan kata lain nya juga rendah, kemungkinan besar menentukan faktor utama yang mempengaruhi tinggi rendahnya nilai h pada proses pengeringan *pneumatic* ini.


 Gambar 5. Grafik hubungan h prediksi dengan h observasi

Hubungan antara h prediksi dan h observasi dapat dilihat pada Gambar 5. Dari gambar ini dapat diketahui, bahwa hubungan antara kedua nilai tersebut sangat dekat dengan nilai $R^2 = 0,796$ yang cukup dekat dengan satu. Hal ini menunjukkan bahwa persamaan h yang diperoleh sangat mungkin dapat dipakai untuk memprediksi nilai koefisien perpindahan panas pada proses pengeringan tepung secara pneumatik dengan baik.

Untuk mengevaluasi pengaruh *dimensionless product* terhadap nilai h maka telah dilakukan uji sensitivitas dengan menaikkan dan menurunkan masing-masing nilai *dimensionless product* tersebut 10 %. Berdasarkan hasil uji sensitivitas tersebut dapat diketahui bahwa secara berturut-turut *dimensionless product* yang paling berpengaruh terhadap h adalah $\frac{V_u^2}{T_{bo}.C_{ppr}}$, $\frac{T_u}{T_{bo}}$, dan $\frac{Q_f^2}{\rho_{pr}^2.D_{pr}^4.T_{bo}.C_{ppr}}$ dimana prosentase pengaruh terhadap nilai h berturut-turut 15,24 %, 7,32 %, dan 4,82 %. Dari sini dapat diketahui bahwa *dimensionless product* $\frac{V_u^2}{T_{bo}.C_{ppr}}$ mempunyai nilai paling pengaruh terhadap nilai h . Rasio kecepatan udara pengering dan temperatur bahan awal yang dikeringkan mempunyai pengaruh yang lebih besar dibandingkan dengan *dimensionless product* yang lainnya.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa hubungan matematis antara koefisien perpindahan panas dengan variabel-variabel proses pengeringan yang dipilih dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$\left(\frac{h}{\rho_{pr}V_u^2.C_{ppr}}\right) = 1,7442 \times 10^{-3} \cdot \left(\frac{T_u}{T_{bo}}\right)^{0,7312} \cdot \left(\frac{Q_f^2}{\rho_{pr}^2.D_{pr}^4.T_{bo}.C_{ppr}}\right)^{-0,4729} \cdot \left(\frac{V_u^2}{T_{bo}.C_{ppr}}\right)^{-1,5002}$$

Persamaan tersebut mempunyai nilai R^2 yang cukup besar (0,796) sehingga dapat dipakai untuk memprediksi nilai koefisien perpindahan panas pada proses pengeringan tepung secara *pneumatic*. Adapun *dimensionless product* yang paling berpengaruh terhadap persamaan tersebut rasio antara kuadrat kecepatan udara pengering dengan hasil kali antara temperatur bahan awal dan panas jenis bahan $\left(\frac{V_u^2}{T_{bo}.C_{ppr}}\right)$. Persamaan tersebut berlaku untuk nilai $\left(\frac{V_u^2}{T_{bo}.C_{ppr}}\right)$ dari 4,43 sampai dengan 5,62, dan rasio temperatur udara pengering dengan temperatur bahan awal $\left(\frac{T_u}{T_{bo}}\right)$ dari 4,714 sampai dengan 5,689, rasio kuadrat laju input bahan dengan hasil kali antara kuadrat densitas partikel, kuadrat diameter partikel, temperatur bahan awal, dan panas jenis bahan $\left(\frac{Q_f^2}{\rho_{pr}^2.D_{pr}^4.T_{bo}.C_{ppr}}\right)$ untuk variasi dari 2.653,1 sampai dengan 7.328,5.

DAFTAR PUSTAKA

- Baker, C.G.J. (1992). *Industrial Drying of Foods*. Blackie Academic and Professional.
- Bertoli, S.L. (2000). Radiant and convective heat transfer on pneumatic transport of particles: an analytical study. *Internasional Journal of Heat and Mass Transfer* **43**: 2345-2363.
- Bunyawanchakul, P., Walker, J.E., Sargison, J.E. dan Doe, P.E. (2007). Modelling and simulation of paddy grain (rice) drying in a simple pneumatic dryer. *Journal of Biosystems Engineering* **96**: 335-344.
- Desrosier, N.W. (2008). *Teknologi Pengawetan Bahan*. Edisi ke tiga, Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta.
- Geankoplis, C.J. (1995). *Transport Processes and Unit Operations*, 3rd, Edn. Prentice-Hall International, Inc., Singapore.
- Mansoori, M., Saffar-Avval, M., Tabrizi, H.B. dan Ahmadi, G. (2002). Modeling of heat transfer in turbulent gas-solid flow. *Internasional Journal of Heat and Mass Transfer* **45**: 1173-1184.
- Pelegriana, A.H. dan Crapiste, G.H. (2001). Modelling the pneumatic drying of food particles. *Journal Food Engineering* **93**(2): 151-161.
- Rajan, K.S., Dhasandhan, K., Srivastava, S.N. dan Pitchumani, B. (2008). Studies on gas-solid heat transfer during pneumatic conveying. *Internasional Journal of Heat and Mass Transfer* **51**: 2801-2813.
- Singh, R.P. dan Heldman, D.R. (1998). *Introduction to Food Engineering*, 3rd. Edn, Academic press, A Harcourt Science and Technology Company.
- Tanaka, F., Uchino, T., Hamanaka, D. dan Atungulu, G.G. (2008). Mathematical modeling of pneumatic drying of rice powder. *Journal of Food Engineering* **88**: 492-498.